DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2023.2140

基于 AnyCasting 大型薄壁鞍座铸造工艺优化

王海啸[1]，丛建臣[1,2]，王进玲[1]，朱玉麒[1]，李　浩[1]，袁　伟[1]，郭前建[1]

(1. 山东理工大学 机械工程学院，山东 淄博 255049；2. 天润工业技术股份有限公司技术中心，山东 威海 264400)

摘　要：针对大型薄壁铸件鞍座铸造过程中易产生缩松、缩孔缺陷等问题，基于 AnyCasting 模拟软件对鞍座的充型和凝固过程进行了模拟。根据模拟结果分析缩松、缩孔缺陷的位置分布，发现铸件内部有缩松、缩孔现象产生，并通过实际浇注试验对比缺陷位置以验证模拟结果的可信性。采用在热节位置添加内冷铁的改进方案，结果表明，原缺陷产生位置在凝固过程中优先凝固，消除了缩松、缩孔缺陷，为类似薄壁铸件实际生产提供相应指导。

关键词：鞍座；数值模拟；工艺优化；铸造缺陷

中图分类号：TG24; O241　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)03-0293-05

Casting Process Optimization of Large Thin-walled Saddle Based on AnyCasting

WANG Haixiao[1], CONG Jianchen[1,2], WANG Jinling[1], ZHU Yuqi[1],
LI Hao[1], YUAN Wei[1], GUO Qianjian[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Tianrun Industry Technology Co., Ltd., Weihai 264400, China)

Abstract: For large thin-walled saddle casting, the shrinkage cavity and porosity easily occur in the casting process. Based on the AnyCasting simulation software, the filling and solidification process of the saddle was simulated. According to the simulation results, the position distribution of the shrinkage cavity and porosity was analysed. The shrinkage cavity and porosity are found to exist in the casting, and the defect location is compared with the actual casting test to verify the credibility of the simulation results. The improvement scheme of adding internal cooling iron at the hot spot position was adopted. The results show that the original defect position is solidified ahead of other parts of the cast, and shrinkage defects are eliminated effectively, which provides corresponding guidance for the actual production of similar thin-walled castings.

Key words: saddle; numerical simulation; process optimization; casting defects

鞍座是悬挂与车架的连接关键零件，由于新开发的鞍座为铸件产品，尺寸较大、结构复杂且壁薄，导致生产过程中易产生缩松、缩孔缺陷等难题。铸造模拟是利用模拟软件对铸件充型和凝固过程进行模拟仿真分析的技术，通过模拟软件验证或改进铸件工艺，能够显著降低缺陷的产生，缩短生产周期、提高产品质量、减少成本和能源消耗[1-4]。汤耿等[5]通过神经网络和遗传算法对铝合金压铸件进行工艺参数优化，在最优工艺参数下，压铸件的凝固时间降低，成形质量有效提高，缩松、缩孔缺陷概率降低。朱慧明等[6]基于 MAGMASOFT 软件对制动钳的流场和温度场进行分析，利用正交试验的方法得到最优的铸造工艺方案，试验表明，该方案结果无缩松、缩孔现象。尤晋等[7]采用灰色关联度与响应面相结合的工艺优化方法，以减小最大减薄率为优化目标，利用 Dynaform 软件模拟仿真，得到最优工艺参数组合，为散热壳体铸件的实际生产提供帮助。陈川川等[8]应用遗传算法对铝合金转向节进行差压铸造工艺优化，以凝固时间、二次枝晶间距和缩松缺陷为质量指标，得到最优工艺参数组合为：浇注温度

收稿日期：2022-05-09

基金项目：国家自然科学基金(12202251, 51805299)；中国博士后科学基金(2022M712393, 2021M702024)；山东省重点研发计划(2019GGX104081, 2019GGX104033)

作者简介：王海啸，1997 年生，硕士研究生. 研究方向：铸造工艺优化. 电话：15866052131, Email: 1755154367@qq.com

通讯作者：丛建臣，1963 年生，教授. 研究方向：金属材料及金属零件的研究与应用. 电话：13573700789, Email:jchcong@tianrun.com

引用格式：王海啸，丛建臣，王进玲，等. 基于 AnyCasting 大型薄壁鞍座铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2023, 44(3): 293-297.

WANG H X, CONG J C, WANG J L, et al. Casting process optimization of large thin-walled saddle based on AnyCasting[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 293-297.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

690 ℃、上模温度 320 ℃、下模温度 350 ℃。通过数值模拟分析验证该最优工艺参数组合的可靠性。张梦琪等[9]针对球墨铸铁汽车轮毂支架进行铸造工艺优化，基于 MAGMASOFT 软件预测产生缩松、缩孔缺陷的位置，通过增加冷铁，能够有效消除铸件中的缺陷。

本文以大型薄壁铸件鞍座为研究对象，设计初始浇注工艺方案，通过 AnyCasting 模拟软件对铸件充型和凝固过程进行数值模拟，预测缩松、缩孔缺陷产生的位置并验证，分析缺陷产生的原因，并对浇注工艺方案进行优化，消除铸件限位挂钩部位缺陷。

1　鞍座工艺分析

1.1　鞍座结构分析

本文以薄壁鞍座为研究对象，三维模型如图 1 所示，外形尺寸为 755 mm×580 mm×322 mm，平均壁厚 10 mm，最大壁厚 30 mm，铸件整体毛坯质量约 63 kg，成品质量为 60.3 kg，其结构对称分布。鞍座材料为 QT700-6，除 Fe 外，其他由 C、Si、Mn、S、P、Mg、Ce、Cr、Cu、Mo 等元素组成，各化学元素所占质量百分数如表 1 所示，QT700 的液相线温度为 1 186 ℃，固相线温度为 1 149 ℃。

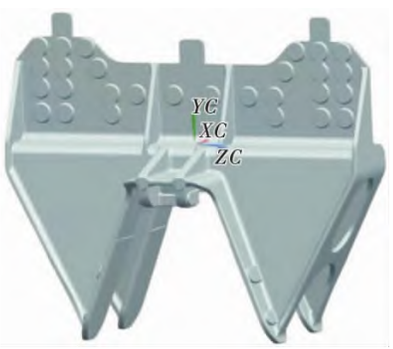


图 1　铸件三维模型
Fig.1　3D model of casting

表1 QT700–6的化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical composition of QT700–6

C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	Mo	Ce	Cr
3.5	1.9	0.4	0.01	0.05	0.035	0.5	0.15	0.006	0.1

1.2　初始工艺方案

本文研究的鞍座为大型薄壁铸件，不易安放冒口，因此，采用无冒口浇注工艺。由于鞍座结构复杂，考虑充型过程平稳和顺序凝固原则，注入方式选择以底注式为主，兼有分层注入式。铸件采用封闭式浇注系统，选择浇注系统各组元截面比为 $\sum_{直}:\sum_{横}:\sum_{内}=1.90:1.65:1.00$，浇注时间为 14 s，内浇道为阻流截面。为保证金属快速充满型腔以及实现均衡凝固，设置 6 个内浇道，1 个环形横浇道，1 个直浇道。由于鞍座尺寸较大，排气量大，本文选择排气孔作为排气通道，在铸件型腔上设计了 3 个排气孔，在砂芯边缘处设计了 4 个排气孔，能够有效减少气孔缺陷的产生[10]。浇注系统三维模型如图 2 所示。

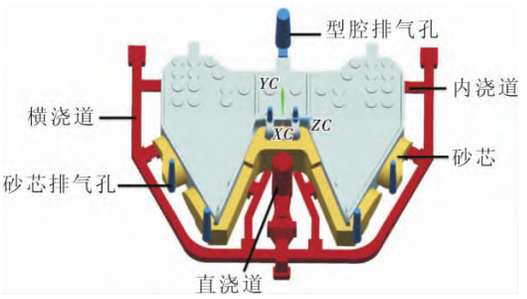


图 2　浇注系统三维模型
Fig.2　3D model of gating system

1.3　初始方案前处理参数的设置

将浇注系统和铸件的三维模型转化为.stl 格式，然后在 Anycasting 软件 AnyPRE 模块中进行网格划分和参数设置。为保证计算精度，采用非均匀网格格式[11]，生成网格数量约为 2 500 万。根据实际生产经验拟设定工艺参数，浇注温度为 1 380~1 390 ℃，由于鞍座为薄壁件，浇注速度不宜设置太慢，初设为 0.4 m/s。铸型和型砂的初始温度设为 25 ℃，铸件与铸型的界面换热系数为变量，数值见表 2，金属液、铸型、型芯与空气的界面换热系数为 41.87 W/(m²·K)[12]，散热方式为空冷。

表2 铸件与铸型的换热系数
Tab.2 Heat transfer coefficient between casting and mold

温度 /℃	1	600	1 149	1 186
换热系数 /(W·m⁻²·K⁻¹)	300	500	600	800

2　初始工艺模拟结果分析

2.1　充型过程分析

根据前文设置的工艺参数对鞍座进行数值模拟，图 3 所示为鞍座充型过程的温度场。在充型初期，金属液由直浇道流入横浇道随后流入 6 条内浇道。如图 3(b)可以看出，金属液逐渐流入铸件下型腔，鞍座下型腔温度超过液相线温度且高达 1 360 ℃以上，仍保持液体状态。随着充型的继续，鞍座型腔内的液面逐渐上升，如图 3(c)充型时间为 8 s 时铸件下型已经完全充满，鞍座型腔薄壁区域温度已降低至 1 320 ℃，靠近内浇口处位置仍为 1 360 ℃。如图 3(d)所示，整个浇注过程即将完成，由于鞍座型腔是中空的，所以在鞍座型腔边缘处温度下降至 1 290 ℃。该铸件采用底注式为主，兼有分层注入式，在充型过程中，金属液流速平稳，整个过程没有产生铁液飞溅和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

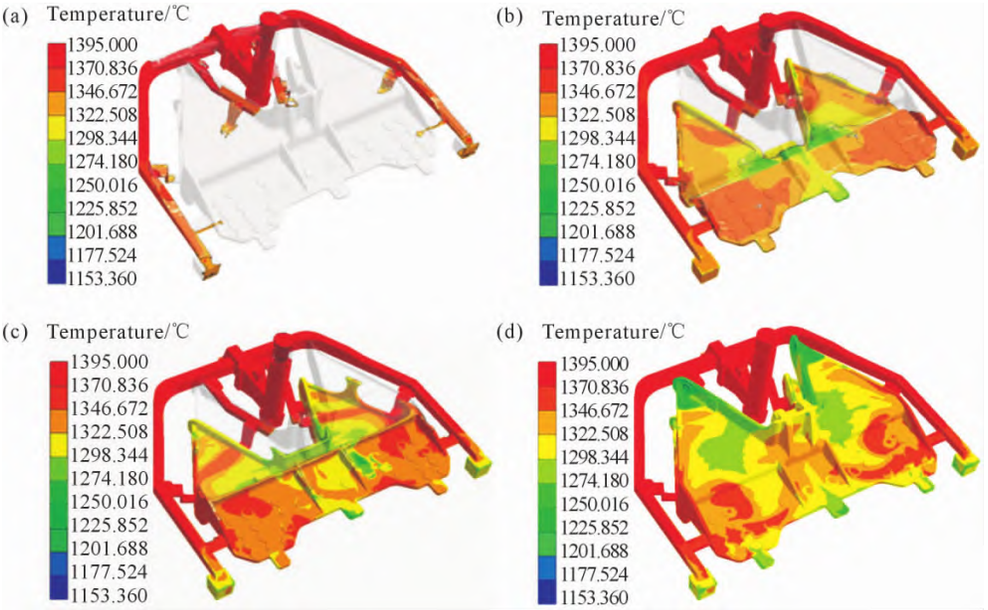


图 3 铸件充型过程的温度场：(a) 充型 25%，(b) 充型 55%，(c) 充型 85%，(d) 充型 100%

Fig.3 Temperature field of casting in the filling process: (a) filling 25%, (b) filling 55%, (c) filling 85%, (d) filling 100%

紊流现象，金属液能够完整充满整个鞍座型腔。

2.2 凝固过程分析

通过分析铸件凝固过程可以观察凝固顺序和孤立熔池区的位置，为预测缩松、缩孔缺陷提供相应指导，鞍座铸造凝固过程分析如图 4 所示。从图 4(a)可以看出，在最初凝固时，鞍座型腔边缘和加强筋最先开始凝固。在图 4(b)中，鞍座温度继续降低，铸件型腔开始出现降温。在图 4(c)中，鞍座型腔中大部分已经完成凝固，在限位挂钩装置处出现孤立液相区，由于该位置存在热节且最高位置的排气孔铁液补缩通道已关闭，无法得到有效补缩，容易形成缩松、缩孔缺陷。从图 4(d)可以看出，鞍座已全部凝固完成。

2.3 缩松、缩孔预测

根据铸件凝固过程温度场分析，认为在铸件限位挂钩处容易出现缩松、缩孔缺陷。图 5 为 AnyCasting 模拟软件预测铸件产生缩松、缩孔缺陷的位置，总体积约为 0.32 cm^3。缺陷位置主要分布在铸件的限位挂钩装置处，该位置易产生热节，为最后凝固区域，导致孤立液相区无法得到有效补缩进而产生缺陷，这与凝固过程模拟结果相符合。采用初始铸造工艺方案进行试铸试验，对试铸件进行切割检测，如图 6 所示，在限位挂钩装置发现缩松、缩孔缺陷，与模拟结果的缺陷位置基本一致，证明了铸件在充型

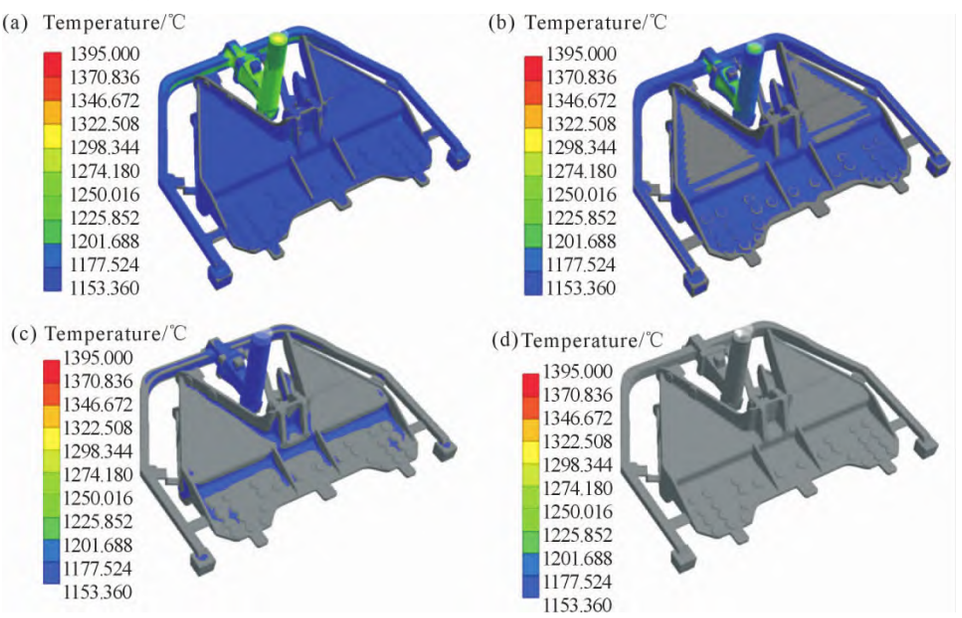


图 4 凝固过程温度场分布：(a) 凝固 20%，(b) 凝固 40%，(c) 凝固 70%，(d) 凝固 100%

Fig.4 Temperature field of casting in solidification process: (a) solidifying 20%, (b) solidifying 40%, (c) solidifying 70%, (d) solidifying 100%

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

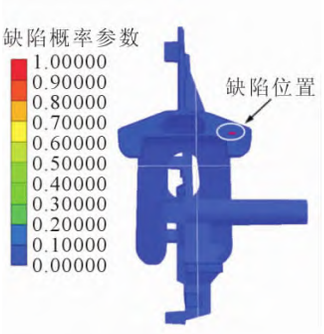


图 5 初始方案缺陷分布及大小
Fig.5 Size and distribution of simulated defects using the initial scheme

和凝固过程模拟结果的可靠性。

3 工艺方案优化

3.1 优化方案

由初始方案模拟凝固过程可知，鞍座在限位挂钩拐角处易产生热节，导致该位置最后凝固，形成孤立液相区，不符合顺序凝固原则，进而产生缩松、缩孔缺陷。由于鞍座结构复杂且壁薄，无法通过设置冒口对热节进行补缩以消除缺陷。因此，为了进一步提高铸件整体质量，在不改变浇注工艺的前提下，采用铸件局部顺序凝固、整体均衡凝固的方法，通过在限位挂钩处安放内冷铁，运用冷铁的激冷效果增加热节处的冷却速度[13-15]。内冷铁采用高碳钢材质，直径为 3 mm 的圆钉，在每个加强筋上放置 5 个圆钉，其直径的选择是根据热节大小确定，冷铁小起不到冷却效果，冷铁大可能造成熔合不良等问题。圆钉的安放位置如图 7 所示。

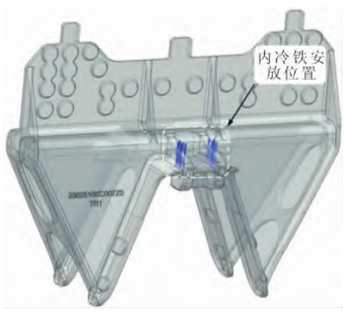


图 7 内冷铁安放位置示意图
Fig.7 Schematic diagram of the placement of the interior cold iron

3.2 优化方案验证

优化方案后，设计的内冷铁起到冷却作用，让热节位置先凝固，降低铸件产生孤立液相区的倾向，有效消除了限位挂钩处的热节。图 8 为最终改进方案模拟铸件缺陷分布图，从模拟结果可以看出，限位挂钩装置处的缩松、缩孔缺陷完全消除。在优化方案的基础上进行试铸试验，对铸件进行切割



图 6 铸件实际缺陷位置
Fig.6 Actual defect location of castings

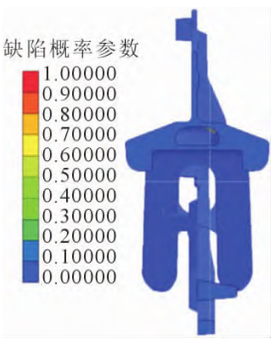


图 8 优化后铸件缺陷分布
Fig.8 Casting defect distribution after optimization

检测，如图 9 所示，缺陷消失与模拟结果一致，证明了优化后工艺方案的合理性。同时内冷铁与浇注的铁液已熔为一体，并未有熔合不良的问题，多余的内冷铁部分通过打磨机打磨掉，可用于实际生产。



图 9 优化后实际铸件图
Fig.9 The actual casting after optimization

4 结论

(1)采用无冒口铸造方式，设计了底注式和分层注入式相结合的封闭式浇注系统，浇注时间为 14 s。为保证金属液快速充满铸件型腔，设计了 6 个内浇道，1 个环形横浇道，1 个直浇道；为有效排出金属液气体、避免气孔缺陷，在铸件型腔上设计了 3 个排气孔，在砂芯边缘处设计了 4 个排气孔。

(2)利用 AnyCasting 模拟软件对充型凝固过程进行分析，模拟结果显示缩松、缩孔缺陷主要分布在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

限位挂钩位置处，总体积为 0.32 cm^3。通过实际浇注，发现铸件实际缺陷位置与模拟结果一致，证明了模拟结果的可信性。

(3)采用添加内冷铁进行工艺优化，让拐角热节位置先凝固，降低铸件产生孤立液相区的倾向，有效消除铸件缩松、缩孔缺陷，并与实际浇注结果一致。

参考文献：

[1] 尹起. 基于 Anycasting 的滑块铸造模拟仿真及工艺优化[D]. 淄博：山东理工大学，2017.
YIN Q. Casting simulation and process optimization of machine sliding block based on Anycasting[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017.

[2] 夏琨，徐向阳，段士伟，等. 基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术，2022, 43(5): 375-381.
XIA K, XU X Y, DUAN S W, et al. Numerical simulation of investment casting of rotor disc based on ProCAST [J]. Foundry Technology, 2022, 43(5): 375-381.

[3] 张玉磊，张纬，孟少峰，等. 侧架铸造工艺数值模拟及优化研究[J]. 铸造技术，2021, 42(7): 606-608.
ZHANG Y L, ZHANG W, MENG S F, et al. Numerical simulation and optimization of side frame casting process[J]. Foundry Technology, 2021, 42(7): 606-608.

[4] 李峰珠，吴倩倩. 转接座压铸数值模拟与工艺优化[J]. 铸造，2022, 71(3): 291-295.
LI F Z, WU Q Q. Process optimization and numerical simulation for die casting of adapter[J]. Foundry, 2022, 71(3): 291-295.

[5] 汤耿，岳冬，徐卫平. 基于 BP 神经网络与遗传算法的罩盖压铸工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2016, 45(19): 114-117, 119.
TANG G, YUE D, XU W P. Optimization of die casting process parameters for cover cap based on BP neural network and genetic algorithm[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(19): 114-117, 119.

[6] 朱慧明，苏小平，李智. 基于正交试验的铝合金制动钳低压铸造工艺多目标优化[J]. 热加工工艺，2022, 51(13): 78-80, 85.
ZHU H M, SU X P, LI Z. Multi-objective optimization of low-pressure die casting processof aluminum alloy brake calipers based on orthogonal test[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(13): 78-80, 85.

[7] 尤晋，龚红英，刘尚保，等. 基于 Dynaform 及响应面法的 6016 铝合金散热壳体冲压成形及优化 [J]. 锻压技术，2022, 47(3): 54-58.
YOU J, GONG H Y, LIU S B, et al. Stamping and optimization on 6016 aluminum alloy radiator shell based on Dynaform and response surface method[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(3): 54-58

[8] 陈川川，苏小平，周大双，等. 基于遗传算法的铝合金转向节差压铸造工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2020, 49(19): 66-69, 72.
CHEN C C, SU X P, ZHOU D S, et al. Optimization of differential pressure casting process parameters of aluminum alloy steering knuckle based on GA[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(19): 66-69, 72.

[9] 张梦琪，冯典东，韩英，等. 汽车轮毂支架的铸造工艺模拟及优化[J]. 铸造技术，2021, 42(9): 793-796.
ZHANG M Q, FENG D D, HAN Y, et al. Simulation and optimization of casting process of automobile wheel hub bracket[J]. Foundry Technology, 2021, 42(9): 793-796.

[10] 李长. 浅谈电动机壳体铸造气孔缺陷分析及改进[J]. 中国铸造装备与技术，2021, 56(4): 32-35.
LI C. A brief talk on analysis and improvement of casting porosity defects in motor shell[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56(4): 32-35.

[11] 肖良红，艾自祯，陆东，等. 基于 ProCAST 的 ZL107 合金进气管倾转铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(10): 1306-1312.
XIAO L H, AI Z Z, LU D, et al. Optimization of tilting casting process for ZL107 alloy intake pipe base on ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10): 1306-1312.

[12] 姚柳，杜航，杨维姝，等. 基于 AnyCasting 的轴承座铸造工艺优化[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版)，2021，35(1): 40-45, 50.
YAO L, DU H, YANG W S, et al. Optimization of bearing block casting process based on AnyCasting[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2021, 35(1): 40-45, 50.

[13] 蔡曙光，王火生，郑建斌，等. 大型液压机机架铸造工艺数值模拟与应用[J]. 铸造技术，2018, 39(6): 1233-1236.
CAI S G, WANG H S, ZHENG J B, et al. Numerical simulation and application of casting process of large-tonnage hydraulic press frame[J]. Foundry Technology, 2018, 39(6): 1233-1236.

[14] 袁颖，高凡，刘云，等. 基于 AnyCasting 的开普单缸缸盖铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2017, 37(12): 1316-1319.
YUAN Y, GAO F, LIU Y, et al. Optimization of casting process for cape single cylinder head based on the AnyCasting software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(12): 1316-1319.

[15] 梁加芳，张孟琨，郑翠华，等. 降低干式缸体渗漏率的工艺措施[J]. 铸造，2017, 66(9): 1005-1007.
LIANG J F, ZHANG M K, ZHENG C H, et al. Control measures to reduce the leakage rate of dry six cylinders[J]. Foundry, 2017, 66(9): 1005-1007.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net